



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Consumo de electricidad y gas en vivienda: casos de estudio en ciudades de México de cuatro regiones climáticas

Electricity and gas consumption in housing: case studies in Mexican cities in four climatic regions

Rodríguez-Muñoz, N.A.^{a*}, Ortega-Avila, N.^a, Nájera-Trejo, M.^b

^a CONAHCYT - Departamento de Ingeniería Sustentable; Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.; C.P. 34147, Durango, Durango.

^b Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.; C.P. 34147, Durango, Durango.

norma.rodriguez@cimav.edu.mx*; naghelli.ortega@cimav.edu.mx; mario.najera@cimav.edu.mx

Innovación tecnológica: Metodología de modelación de vivienda para cuantificar requerimientos energéticos.

Área de aplicación industrial: Aplicación en la industria de la construcción, diseñadores y desarrolladores de vivienda, tomadores de decisiones en política pública energética y de vivienda, usuarios de tarifa eléctrica doméstica.

Recibido: 18 agosto 2022

Aceptado: 30 mayo 2023

Abstract

Mexican families allocate a significant proportion of their income to paying energy bills such as electricity and gas, necessary for the use of electrical appliances, air conditioning, and sanitary water heating. This research discusses the challenges that Mexican families have in paying for the energy required to satisfy their needs for thermal comfort and water heating for sanitary use. Simulations were carried out to quantify the energy required to maintain thermal comfort and heat water for sanitary use in four Mexican cities: Cancún, Quintana Roo with a tropical climate; Hermosillo, Sonora with hot arid; Durango, Durango with a temperate semi-arid, and Puebla, Puebla with a temperate sub-humid climate. Thus, the minimum and maximum average temperatures inside, the monthly bills, and the total annual expenses for energy were calculated. In all the cities, except for Puebla, maximum interior temperatures of 30 °C were reached, while in all the cities except Cancún, indoor temperatures were below 18 °C. Furthermore, it was found that

the city that requires more energy to achieve thermal comfort and heat water is Hermosillo (hot-arid climate); however, there is a higher expense in Durango (temperate semi-arid climate). In all cases, water heating represents up to 66% of the energy cost in Mexican homes, with Durango and Puebla being the cities where the greatest amount of energy is required to bathe with hot water. It is also deduced that due to the high monthly expenses for electricity and gas that households need to make, families need to take energy deprivation measures to prioritize food and transportation expenses, putting them at risk of energy poverty. Finally, it is essential to continue taking action to improve the design and construction of Mexican housing, adapt existing regulations and improve the availability of economical and efficient equipment to meet the energy needs of Mexican families.

Keywords: cooling, heating, thermal comfort, water heating.

Resumen

Las familias mexicanas destinan una proporción importante de su ingreso al pago por energéticos como la electricidad y el gas; los cuales son necesarios para el uso de electrodomésticos, climatización y el calentamiento de agua sanitaria. A través de esta investigación se ponen a discusión los retos que tienen las familias mexicanas para costear la energía requerida para satisfacer sus necesidades de confort térmico y calentamiento de agua sanitaria. Con este fin, se realizaron simulaciones para cuantificar la energía requerida para mantener el confort térmico y calentar agua de uso sanitario en cuatro ciudades mexicanas: Cancún, Quintana Roo con clima tropical; Hermosillo, Sonora con clima árido cálido; Durango, Durango con clima templado semiárido, y Puebla, Puebla con clima templado subhúmedo. Así, se calcularon las temperaturas promedio mínimas y máximas en el interior, las facturas mensuales y el monto total anual a desembolsar por la energía. En todas las ciudades, con excepción de Puebla, se alcanzaron temperaturas máximas en el interior de 30 °C, mientras que, en todas las ciudades excepto Cancún, se tuvieron temperaturas interiores menores a los 18 °C. Se encontró que la ciudad que requiere más energía para lograr confort térmico y calentar agua es Hermosillo (clima árido cálido); sin embargo, en Durango (clima templado semiárido) se tiene un desembolso mayor. En todos los casos el calentamiento de agua representa hasta un 66% del costo por energéticos en los hogares mexicanos, siendo Durango y Puebla las ciudades donde se requiere mayor cantidad de energía para bañarse con agua caliente. También se deduce que debido a los altos gastos por electricidad y gas que requieren realizarse en los hogares mensualmente, las familias necesitan tomar medidas de privación energética para dar prioridad a gastos de alimentación y transporte, poniéndose en riesgo de pobreza energética. Finalmente, es esencial continuar tomando acciones de mejoramiento en el diseño y construcción de la vivienda mexicana, realizar la adecuación de la normativa existente y mejorar la disponibilidad de equipamiento económico y eficiente para lograr satisfacer las necesidades energéticas de las familias mexicanas.

Palabras clave: aire acondicionado, calefacción, calentamiento de agua, confort térmico.

1. Introducción

Las edificaciones son responsables del 38% de las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) (Global Alliance for Buildings and Construction GABC, 2020) y de aproximadamente una cuarta parte del consumo energético a nivel mundial (International Energy Agency IEA, 2021). Estadísticas de la Agencia Internacional de Energía muestran que el uso final de energía en el sector de edificios aumentó de 118 EJ en 2010 hasta casi 130 EJ en 2019; donde los usos energéticos que se han incrementado con mayor velocidad son los relacionados con el enfriamiento de espacios y el uso de electrodomésticos (International Energy Agency IEA, 2021).

En 2020, el consumo de energía en el sector residencial en México ascendió a 914.87 PJ, de los cuales 330.28 PJ corresponden a uso de leña, 260.09 PJ a electricidad y 289.54 PJ a gas licuado de petróleo (gas L.P.) (SENER, 2021). Al comparar con las cifras de 2019, se puede observar que se tuvo un incremento del 12.04% en el consumo de electricidad y 25.32% en el uso del gas L.P.; por otro lado, es importante mencionar que el uso de la energía solar en los hogares también tuvo un aumento del 14.32%. A través de diversos estudios se ha identificado que existe una mejora en la eficiencia energética en los hogares mexicanos y que ya se observa un cambio en la tendencia de crecimiento del uso de la energía eléctrica.

Actualmente, la intensidad en el uso de la energía es menor, incluso aunque se ha incrementado el equipamiento de los hogares, otra tendencia observable es que hay un crecimiento menor del consumo de electricidad en las casas en climas templados (SENER - CONUEE, 2018). Una situación destacable es que el 90% del consumo de electricidad en los hogares mexicanos se hace con equipos que están regidos por alguna

Norma Oficial Mexicana (NOM), por lo que en lo general cumplen con requerimientos mínimos de desempeño (SENER - CONUEE, 2018). En el mismo sentido, se ha identificado que en el 50.6% de los hogares existe disposición al ahorro de energía eléctrica y que hay conciencia en la compra de equipos ahorradores, principalmente en hogares urbanizados (Morales-Ramírez, Dionicio, Alvarado-Lagunas, Elías, González Del Ángel, 2021).

En el Código de Edificación de Vivienda, los edificios de uso residencial en México se clasifican en seis categorías de acuerdo a su precio y superficie construida: económica (40 m²), popular (50 m²), tradicional (71 m²), media (102 m²), residencial (156 m²) y residencial plus (más de 188 m²) (SEDATU - CONAVI, 2017). De estas, las viviendas del tipo económica, popular y tradicional son consideradas como Vivienda de Interés Social (VIS), que son las destinadas a las personas con menores ingresos. En los últimos tres años, el registro de vivienda popular y tradicional concentra más del 70% del total (Registro Único de Vivienda (RUV), 2022).

No obstante, aún existen numerosos problemas asociados a la construcción masiva de vivienda, entre ellos la edificación de fraccionamientos en las periferias urbanas, hacinamiento, falta de infraestructura de agua y saneamiento, baja calidad y durabilidad de los materiales, entre otros (ONU-Hábitat, 2019). El programa de Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) de la Organización de las Naciones Unidas, calcula que en las zonas urbanas 1,100 millones de personas viven en condiciones de habitabilidad inadecuada; por lo que hace un llamado a mejorar la calidad de vida de las familias de menores recursos a través del acceso a vivienda adecuada y accesible (Berkowitz, Bill, Brownlee, 2022).

1.1. Energía en la vivienda

En los hogares se utiliza energía para la realización de distintas actividades que conllevan la satisfacción de las necesidades básicas como el uso de electrodomésticos, iluminación, enfriamiento y calentamiento de espacios, calentamiento de agua, cocción y conservación de alimentos (refrigerador). Así, las familias deben destinar una porción de su ingreso para la compra del equipamiento requerido y para la operación del mismo. Sin embargo, debido a los bajos ingresos que prevalecen en México, se ha encontrado que existe dificultad para satisfacer las necesidades energéticas. De acuerdo a la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos en los Hogares (ENIGH) (INEGI - Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2021), los ingresos trimestrales promedio por hogar fueron de \$55,073, mientras que para el primer decil fueron de \$11,127 (\$52.8 pesos diarios por perceptor). La dificultad de costear las necesidades energéticas ha sido documentada por diversos estudios; la cual persiste, aunque los precios de los energéticos en México no son necesariamente elevados, comparados con otras partes del mundo (Daniel Howdle, 2022).

En el caso particular de la electricidad, su bajo costo a nivel residencial se debe principalmente a la existencia de un subsidio universal al consumo, es decir, para cualquier usuario final, siempre y cuando no se excedan ciertos límites regionales preestablecidos, en cuyo caso existe un régimen de excepción para aplicar una tarifa “doméstica de alto consumo (DAC)” (Beltrán Nishizaki, 2020). Al respecto, Gopal et al. analizaron la aplicación de programas de incentivos financieros, bajo la hipótesis de que los subsidios al consumo final de energía eléctrica reducen la percepción del valor de la eficiencia energética para el consumidor y aumentan los costos al gobierno (Gopal,

Leventis, Phadke, & de la Rue du Can, 2014). Encontraron que si se evitan estos subsidios se podrían cubrir los costos de manufactura de aires acondicionados, refrigeradores y televisores más eficientes que los modelos con eficiencia promedio. Igualmente, a través de un estudio de privación de servicios energéticos en México se encontró que sin importar la región climática donde viven las familias, existe un acceso desigual a los servicios energéticos (García Ochoa, Ávila-Ortega, & Cravioto, 2022); por lo que habría que repensarse la política energética para atender esta compleja desigualdad.

La vivienda económica, su problemática y sus posibles soluciones han sido ampliamente estudiadas mundialmente, y México no es la excepción. Además, desde hace décadas se ha identificado que hay una tendencia de incremento en el uso de la energía eléctrica, la cual permanecerá igual si no se tienen cambios en la penetración de las tecnologías, el uso del equipo y el tamaño de la vivienda (Rosas-Flores & Gálvez, 2010). En un contexto similar, Hancevic y López Aguilar estimaron reducciones en el uso de energía en el sector residencial al aplicar un escenario de mejoramiento en la eficiencia energética, a través del reemplazo masivo de electrodomésticos; se determinaron reducciones de 9.9% en el consumo de energía, 3.9 millones de toneladas de CO₂ y una potencial reducción en subsidios de 7.5 billones de pesos por año (Hancevic & López-Aguilar, 2019).

En otra investigación se calculó el requerimiento energético de sistemas de acondicionamiento de aire, como aires acondicionados, calefactores y ventiladores, en tres regiones climáticas en México (Rosas-Flores & Rosas-Flores, 2020) y se determinó que el 19% del consumo de energía en el sector residencial se destina a estos sistemas. También encontraron que se podrían ahorrar 94.7 TWh y evitar 44.6 MM toneladas de CO₂

si se utilizara aislamiento térmico en todas las casas existentes y proyectadas hasta el 2030. Por su parte, Oropeza-Pérez realizó un análisis de sensibilidad del desempeño energético de aires acondicionados y de la aplicación de medidas pasivas de enfriamiento en vivienda mexicana, a partir del cual estimó ahorros de 770 USD en las facturas de electricidad y retornos de inversión tan bajos como dos años por el uso de equipo altamente eficiente (Oropeza-Pérez, 2016).

1.2. Pobreza energética

Considerando que algunos estudios estiman que la relación entre el gasto energético y el ingreso total de las familias es un elemento clave en el análisis de la pobreza energética, en la investigación de Santillán et al. se calculó que en México 29.7% de la población vive en pobreza energética, mientras que 17% se encuentra en pobreza energética extrema (Santillán, Cedano, & Martínez, 2020); sin embargo, únicamente en el 9.4% de los hogares con pobreza energética sobrepasa el 10% del ingreso destinado a servicios energéticos. Esto podría estar relacionado con que la electricidad se encuentra subsidiada y que en algunas ocasiones los combustibles que se usan para cocinar (como la leña) pueden carecer de un costo económico directo. En otro estudio se calculó que aproximadamente el 37% de los hogares mexicanos (11 millones) viven en pobreza energética, donde la mayor privación se da en el confort térmico en el clima cálido, que padecen el 33% de las familias, y destaca que un 8.7% no tienen acceso a algún medio de calentamiento de agua para el aseo personal (García-Ochoa & Graizbord, 2016a). Sin embargo, este último nivel de acceso es muy dispar entre niveles de ingresos, dado que al 2006 solo el 6% de los hogares en el decil I contaban con un calentador de agua a gas, mientras que las viviendas del decil X

tuvieron un 106% de cobertura (Rosas, Sheinbaum, & Morillon, 2010).

Por otro lado, también se percibe que existe una heterogeneidad espacial en los niveles de privación de los bienes económicos, donde Guerrero y Chiapas tienen un índice de pobreza energética en el hogar por arriba del 70%, mientras que Baja California tiene un 12% (García-Ochoa & Graizbord, 2016a). García y Graizbord calcularon la privación de los servicios energéticos en México, donde hasta un 42.1% de los hogares urbanos en climas cálidos se privan del uso de aire acondicionado (enfriamiento) y 18.6% de calentamiento de agua (García Ochoa & Graizbord, 2016b). Ahora bien, al clasificar a los hogares por ingresos, determinaron que las familias de ingresos menores a \$7,062 pesos trimestrales presentan una privación de hasta el 73.7% en el uso de aire acondicionado y un 82.9% en el calentamiento de agua.

Por otra parte, en la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares de INEGI, se determinó que solo el 43.5% de los hogares cuentan con algún calentador de agua, con una distribución particular (56% en el centro del país, 48% en el norte y 9% en el sur), siendo más del 75% tecnologías que queman gas; además, destaca que solo el 6.3% de las viviendas tienen un calefactor, situación que varía enormemente entre regiones (20.4% en la región norte y 1.6% en la región sur) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018).

Adicionalmente, Collins menciona que el estar en habitaciones con temperaturas menores a los 16 °C incrementa el riesgo de adquirir una enfermedad respiratoria y que a los 12 °C se tiene riesgo de un problema cardiovascular (Collins, 1986), estos riesgos son especialmente adversos para población vulnerable como infantes y adultos mayores. Mientras que en una investigación por Flores-

Larsen y Filippín concluyeron que las familias de bajos recursos no pueden afrontar los periodos de ondas de calor de forma resiliente, debido al diseño ineficiente de la vivienda; y encontraron que el 39% de los hogares no encienden el equipo de enfriamiento debido a restricciones económicas (Flores-Larsen & Filippín, 2021).

En cuanto a las consecuencias de la privación de servicios de agua caliente para aseo personal, Reyes determinó que, para limitar su consumo de gas, los habitantes de viviendas “populares” en la Ciudad de México llegan a reducir a cinco minutos el tiempo para ducharse, calientan el agua directamente en la estufa o incluso usan una resistencia eléctrica (Reyes, 2021). Igualmente destaca que los residentes de la colonia analizada ven la falta de acceso a mejores tecnologías como un obstáculo para reducir su consumo de gas, aunque el 21% no cuenta con calentador de agua y solo 3% tiene un calentador solar. Esta situación reduce en general la calidad de vida de estas personas, sobre todo en la temporada fría, dado que el gasto más alto en energía es el de adquisición de gas, por lo que deben ajustar sus actividades o usar herramientas rudimentarias para su aseo personal.

Esta investigación se enfocó en calcular los requerimientos energéticos relacionados al uso de aire acondicionado para enfriamiento y calefacción y al calentamiento de agua, en una vivienda económica construida en cuatro ciudades con distintos climas (tropical, desértico, templado semiárido y templado subhúmedo). El objetivo de este análisis fue el de cuantificar las facturas mensuales a pagar por estos servicios energéticos y el impacto que tienen sobre el presupuesto familiar.

2. Métodos

Se realizaron simulaciones de forma horaria durante un año típico meteorológico de una vivienda tipo, para cuatro ciudades mexicanas ubicadas en distintas regiones climáticas, con el programa Energy Plus a través de la interfaz Design Builder v4.7. EnergyPlus es un programa de simulación energética para realizar análisis energético y estimación de cargas térmicas en las edificaciones (U.S. Department of Energy's - DOE y National Renewable Energy Laboratory - NREL). Este programa permite la modelación de la edificación en tres dimensiones, la implementación de los sistemas constructivos y sus propiedades, el horario e intensidad de ocupación, así como la incorporación de las características de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). A través del programa se realiza la simulación energética a través de balances de energía entre el ambiente interior de la edificación y las condiciones meteorológicas exteriores en periodos horarios.

La vivienda analizada se encuentra orientada hacia el sur y está construida con sistemas constructivos y materiales genéricos como lo son el bloque de concreto, losa de vigueta-bovedilla y ventanas de aluminio con cristal sencillo. En la modelación se consideró que la vivienda tiene dos casas contiguas, una de cada lado, para representar adecuadamente el adosamiento de la vivienda estudiada. En la Figura 1 se observa la fachada y el plano de distribución de la vivienda, que consta de dos recámaras, un baño, un área que funge como cocina-sala y un patio de servicio interior. La casa tiene una altura de piso a techo de 2.95 m y tiene 51.25 m² de construcción, de los cuales 47.6 m² son de área a climatizar y tiene un volumen de aire para acondicionar de 118.9 m³.



Figura 1. Fachada y plano de vivienda estudiada (INMUVI-Durango).

De acuerdo a la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en la Vivienda (ENCEVI) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), únicamente el 5% de las viviendas en México tienen al menos un tipo de aislante térmico, siendo Sonora el estado con mayor número de viviendas aisladas (395,534 viviendas) y Tlaxcala con el menor (2,646 viviendas). El 14.9% de las viviendas en la región cálida extrema y el 1.5% de las viviendas en las regiones templada y tropical cuentan con aislamiento térmico en algún elemento de la vivienda (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018). En la encuesta se desagrega la información de la región cálida extrema, donde se encontró que, de las viviendas aisladas, el 89.6% de la vivienda tiene techos aislados, por lo que la cubierta o losa

considerada fue aligerada compuesta de vigueta y bovedilla; mientras que el suelo de la vivienda es de concreto y piso cerámico directamente sobre el terreno.

En la Tabla 1 se muestran los materiales que conforman los sistemas constructivos de muros, techo, piso y ventanas, su espesor y el coeficiente total de transferencia de calor (Valor U). Se observa que los muros de la vivienda son de bloque de concreto sin aislar. La vivienda tiene cinco ventanas hacia el exterior, las cuales son de cristal claro con marco de aluminio, también cuenta con dos ventanas hacia el patio interior; en total la vivienda tiene 8.26 m² de área acristalada. Mientras que cuenta con dos puertas de tipo tambor de madera hacia el exterior (3.2 m²) y tres puertas interiores.

Tabla 1. Información de los sistemas constructivos de la vivienda.

Sistema	Materiales	Espesor total (m)	Valor U (W/m ² ·K)
Muros exteriores	Pintura blanca Enjarre de mortero Bloque de concreto Yeso	0.2464	2.076
Muros interiores	Bloque de concreto	0.2000	1.663

Techo	Concreto Vigueta pretensada y bovedilla Yeso	0.2450	0.875
Suelo	Piso cerámico Concreto Tierra	0.4000	1.814
Ventanas	Cristal claro	0.0030	6.257 *SHGC= 0.858
Puertas	Puerta de madera tipo tambor	0.0350	0.7800

*SHGC: Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (Solar Heat Gain Coefficient).

2.1.Clima y uso de energía

La vivienda está habitada por una familia de cuatro personas que salen durante el horario laboral y escolar. Esta ocupación se consideró como típica debido a que, de acuerdo a INEGI, las viviendas mexicanas se habitan en promedio por 3.6 personas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020).

Se consideraron cuatro escenarios de ocupación y uso de los sistemas de climatización para las viviendas: (1) sin equipo de climatización, (2) climatización 24 horas continuas, (3) climatización durante su ocupación y (4) climatización durante ciertos periodos de ocupación. El primer escenario se utiliza para determinar las temperaturas interiores en el caso de que la vivienda no posea equipo de climatización o no lo encienda. El segundo escenario se utiliza para conocer el requerimiento energético de la vivienda bajo el uso automático del sistema de climatización, en el supuesto de que la vivienda se encuentra habitada por alguna persona que permanezca continuamente en el hogar (adultos mayores, bebés e infantes o alguna persona que haga labores del hogar) o como en el caso de confinamiento por la COVID-19. Mientras que para el escenario

(3) se consideró un uso de los sistemas de climatización durante el tiempo que la vivienda se habita (lunes a viernes de 18:00 h a 8:30 h y durante el fin de semana las 24 horas). Finalmente, el escenario (4) considera que los sistemas se apagan durante la noche al dormir, por lo que operan de lunes a viernes de 7:00 h a 8:30 h y de 18:00 h a 23:00 h y el fin de semana de 7:00 h a 23:00 h (Urban & Gomez, 2013).

También se consideró que las personas que habitan la vivienda se encuentran realizando una actividad de pie de forma relajada, equivalente a 1.0 Met¹, con una vestimenta de 1.0 Clo en invierno y de 0.5 Clo en verano². La vivienda cuenta con iluminación y equipamiento con electrodomésticos básicos, cuyo consumo mensual es de 100 kWh; este se considera como base para el cálculo de los requerimientos energéticos mensuales (Lucero-Álvarez, Rodríguez-Muñoz, & Martín-Domínguez, 2016).

La temperatura de la vivienda se mantiene dentro del rango de temperaturas que brinda confort térmico durante su ocupación, dependiendo de las características meteorológicas de la región climática en la

¹ El metabolismo de una persona es medido usando las unidades Met. Se considera que una persona en confort térmico con una actividad de un Met presentará una pérdida de calor de 100 W.

² Un Clo representa a la ropa que tiene una resistencia térmica de 0.155 m² °C/W; donde un Clo de cero simboliza a una persona desnuda mientras que un Clo de 1.0 representa un traje de oficina.

cual se encuentra la ciudad. En la Tabla 2, se presenta el tipo de clima que presentan las ciudades objeto de estudio y el rango de temperaturas dentro del cual se mantiene un confort térmico adecuado; asimismo, estas temperaturas se utilizan para el

establecimiento de los termostatos que encienden y apagan los sistemas de climatización. En la misma tabla se menciona la clasificación climática a la que pertenecen las ciudades de acuerdo al sistema Köppen-Geiger y a la utilizada por INEGI.

Tabla 2. Tipo de clima y cálculo de rango de confort térmico para cada ciudad.

Ciudad	Tipo de clima		T_{ma}	T_c	ΔT_c	Temperaturas para termostatos (°C)	
	Köppen-Geiger *	INEGI †	°C			T_{c-min}	T_{c-max}
Cancún, Q.R.	Aw - tropical	Cálido subhúmedo	26.00	27.54	4.50	25.29	29.79
Hermosillo, Son.	BWh - árido cálido	Seco cálido muy seco	24.20	26.57	4.50	24.32	28.82
Durango, Dgo.	BSk - semiárido frío	Seco templado y semifríos semisecos	18.70	23.60	4.00	21.60	25.60
Puebla, Pue.	Cwb - templado de montaña con invierno seco	Templado subhúmedo	16.70	22.52	4.00	20.52	24.52

Fuentes: *(Climate-Data.org, 2022), † (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022).

El concepto de confort térmico se refiere a la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico circundante, es evaluada a través de una valoración subjetiva y se determina considerando condiciones psicológicas, fisiológicas y ambientales (ANSI/ASHRAE, 2013).

Las personas que viven en climas cálidos y tropicales, necesitan una variedad diferente de condiciones de confort térmico que las personas en climas templados. Asimismo, las personas que viven permanentemente en espacios acondicionados tienen una banda más estrecha de comodidad, en comparación con personas que habitan en edificios naturalmente ventilados. Esto es, las personas tienen distintas expectativas de las condiciones térmicas dependiendo donde se

encuentren. Por otro lado, la teoría del confort térmico adaptativo indica que el confort térmico depende de las condiciones exteriores históricas y de la capacidad de la persona para controlar el entorno. Esta teoría sugiere que los humanos son capaces de adaptarse a una gama amplia de condiciones térmicas, lo cual tiene un impacto importante en las condiciones de confort de los edificios esperadas (uso de termostatos) y, por lo tanto, del consumo de energía (Alliance for an Energy Efficient Economy AEEE, 2020).

Las temperaturas de confort térmico mínimas y máximas fueron calculadas con el método adaptativo de Humphreys y Nicol utilizando la ecuación (1) para calcular la temperatura de confort mensual (T_c), mientras que con las ecuaciones (2) y (3) se calcularon las

temperaturas mínimas y máximas (Nicol & Humphreys, 2002). Este método de confort térmico se ideó para introducir nociones de sustentabilidad a los estándares de confort, en contraste con los índices racionales tradicionalmente utilizados. Ya que todas las personas, conscientemente o inconscientemente, nos adaptamos constantemente a las condiciones climáticas cambiantes de nuestro planeta.

$$T_c = 13.5 + 0.54T_{ma} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$T_{c-\min} = T_c - \Delta T_c / 2 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$T_{c-\max} = T_c + \Delta T_c / 2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Para esta investigación se calculó la temperatura exterior media mensual (T_{ma}) a través de información climática de cada ciudad obtenida del programa Meteonorm versión 7.3. Mientras que, con la amplitud de la oscilación promedio de la temperatura del

aire (ΔT_a), se identificó la amplitud de la zona de confort (ΔT_c) (Barrios, Guillermo, Elías, Pablo, Huelsz, Guadalupe, Rojas, 2010). Las ciudades estudiadas se encuentran en cuatro clasificaciones climáticas distintas (tropical, desierto, semiárida templada y templada subhúmeda), por lo que la temperatura de confort (T_c) para cada una de ellas varía con la temperatura ambiental.

En la Figura 2 se muestra la información de las variables climáticas promedio mensual de las ciudades analizadas, aquí se observan las diferencias particulares a las cuales se exponen las personas que habitan las viviendas en estas localidades. Se presentan la temperatura promedio (T_a), temperatura mínima ($T_{a-\min}$), temperatura máxima ($T_{a-\max}$) y la humedad relativa promedio mensual (RH).

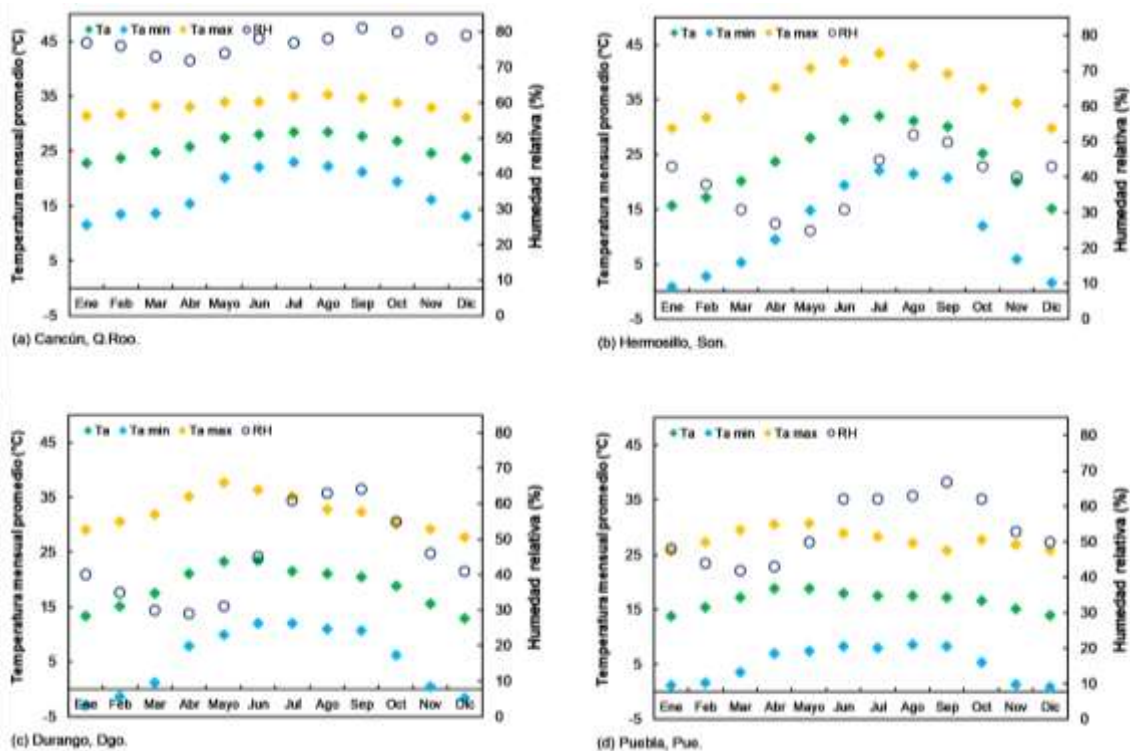


Figura 2. Temperaturas mensuales promedio y humedad relativa.

El equipamiento utilizado para mantener el confort térmico en la vivienda fue de sistemas de aire acondicionado y calefacción clase “D”; el cual corresponde a una escala media entre lo que se consideraría un equipo muy eficiente y uno poco eficiente. El equipo para enfriamiento es de tipo minisplit con un Coeficiente de Eficiencia Energética (EER: Energy Efficiency Ratio) de 1.8. Mientras que para el calentamiento de las viviendas durante los meses fríos se utiliza un sistema de calefacción tipo radiante-convectivo que utiliza gas L.P. con un COP de 2.35. También se incorporó un calentador de agua a gas con depósito de 40 L, el cual es utilizado en el 47% de las viviendas del país que cuentan con algún equipo de calentamiento de agua (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018). En este caso, se consideró que la eficiencia del calentador es del 74% (Diario Oficial de la Federación, 2021), y las cuatro personas se duchan diariamente (ocho minutos por ducha) una tras otra, es decir, en un solo periodo continuo cada día, a una temperatura media de 38 °C, con una

regadera que tiene un gasto de 7 l/min (Diario Oficial de la Federación, 1998).

El gasto energético diario (Q_r) por uso del calentador de agua de depósito a gas se determinó a partir de la ecuación (4), en donde el primer término representa el calor necesario para calentar el agua confinada desde la temperatura de la red local hasta 15 °C por arriba de la requerida para lograr la salida de la regadera a 38 °C, mientras el resto de los términos contabilizan el calor necesario para mantenerla durante la extracción de agua caliente. Es importante puntualizar que se consideró que no se requiere encender el calentador de agua en aquellos días que la temperatura interior de la vivienda es superior a 30 °C. En la Tabla 3 se muestran los datos de la temperatura promedio del agua de la red local, tomados del Sistema Meteorológico Nacional, y que corresponden a la temperatura media normal mensual en 2021 (SMN - CONAGUA, 2022), así como la fracción de días que se requiere encender el calentador de agua.

$$Q_r = \frac{M_d(h_d - h_a) + 4[(\dot{m}_s h_s - \dot{m}_a h_a)\Delta t - M_d C_p \Delta T_d]}{\eta_{FP}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde M_d es la masa de agua dentro del depósito del calentador, $\dot{m}_s$ y $\dot{m}_a$ son los flujos máscicos de salida de agua caliente y de entrada de agua fría al calentador, respectivamente; h_d , h_s y h_a son las entalpías del agua confinada, la que se extrae y la que

ingresa en el depósito una vez que se inicia la extracción, Δt es el periodo que dura cada ducha, ΔT_d es la reducción de temperatura del agua confinada durante la extracción, η es la eficiencia del calentador y FP es un factor de corrección de presión por la altitud del lugar.

Tabla 3. Temperatura del agua de la red local y fracción de días con calentador encendido para cada ciudad.

Mes	Cancún, Q.R.		Hermosillo, Son.		Durango, Dgo.		Puebla, Pue.	
	T _a (°C)	f (-)	T _a (°C)	f (-)	T _a (°C)	f (-)	T _a (°C)	f (-)
Enero	25.8	1.000	17.3	1.000	12.6	1.000	15.9	1.000
Febrero	26.5	1.000	19.0	1.000	16.8	1.000	16.5	1.000
Marzo	28.4	0.997	20.5	1.000	18.8	1.000	19.5	1.000

Abril	30.0	0.932	26.0	0.961	21.1	1.000	20.5	1.000
Mayo	31.0	0.824	28.8	0.906	23.5	0.828	20.3	1.000
Junio	30.5	0.717	33.1	0.518	23.6	0.940	18.9	1.000
Julio	31.4	0.638	32.3	0.614	21.4	1.000	18.9	1.000
Agosto	31.0	0.674	32.1	0.818	22.1	1.000	18.9	1.000
Septiembre	30.6	0.786	30.2	0.893	21.1	1.000	18.5	1.000
Octubre	29.9	0.885	26.6	1.000	19.9	1.000	18.3	1.000
Noviembre	26.3	0.997	24.8	1.000	16.1	1.000	15.5	1.000
Diciembre	27.0	1.000	19.4	1.000	15.7	1.000	15.9	1.000

2.2. Costos de la energía

En la Tabla 4 se presentan los precios promedio de la electricidad y la tarifa de electricidad doméstica correspondiente a cada ciudad (Morales, 2022), sin embargo, los precios utilizados para los cálculos fueron

los correspondientes al año 2021, de los cuales se puede consultar el detalle mensual en el portal de tarifas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para las cuatro ciudades estudiadas (Comisión Federal de Electricidad, 2022).

Tabla 4. Tarifa de electricidad por ciudad.

Ciudad	Tarifa	Rango de consumo (kWh) Precio promedio (\$/kWh)			
		Básico	Intermedio bajo	Intermedio alto	Excedente
Durango, Dgo. y Puebla, Pue.	1	0-75 0.882	76-140 1.073	-	141 en adelante 3.134
Cancún, Q.R.	1D	0-75* 0-175† 0.786	76-200* 176-400† 0.911	- 401-600† 1.177	201 en adelante* 601 en adelante† 3.134
Hermosillo, Son.	1F	0-75* 0-300† 0.653	76-200* 301-1200† 0.815	- 1201-2500† 1.062	201 en adelante* 2501 en adelante† 3.134

* fuera de verano, † verano.

Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2022; Morales, 2022).

A las ciudades de Durango y Puebla les corresponde la tarifa 1, la cual es implementada en lugares con temperaturas promedio anual de menos de 25 °C, con un límite de 140 kWh de consumo mensual antes de tener un consumo excedente y pagar un precio más elevado. Por otro lado, las otras dos ciudades se encuentran dentro de tarifas de electricidad 1D (Cancún, Q.R.) y 1F (Hermosillo, Son.), con límites de consumo de 1,200 kWh y 2,500 kWh al mes para evitar tener un consumo excedente. La tarifa 1 no diferencia la temporada de invierno o verano, por lo que aplican los mismos precios durante todo el año, mientras que para las tarifas 1C, 1D, 1E y 1F se tiene distinción en el rango de consumo mensual, dependiendo de si la localidad se encuentra en la temporada de verano o fuera de verano. Es importante mencionar que, de acuerdo a información de la CFE, se estima que al 26% de los usuarios domésticos se les aplican las tarifas 1C a 1F, que son las que se encuentran con mayor subsidio debido al alto requerimiento de electricidad para enfriamiento durante la época de verano (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE, 2017).

Con respecto al gas LP, se consideró el precio promedio por cada litro consumido, reportado por los distribuidores al 28 de febrero de 2022: \$12.13, \$12.69, \$13.64 y \$12.37, para Quintana Roo, Sonora, Durango y Puebla, respectivamente (CRE Comisión Reguladora de Energía, 2022).

3. Resultados

A través de la realización de las simulaciones en las ciudades estudiadas, se obtuvo información sobre las temperaturas al interior de la vivienda sin la utilización de sistemas de climatización. Dentro de las suposiciones se establecieron cuatro escenarios de ocupación: (1) la vivienda no cuenta con equipo de climatización, (2) la vivienda se mantiene climatizada las 24 horas, (3) la vivienda se

climatiza durante su ocupación y (4) la vivienda se climatiza durante ciertos periodos. Se calculó el requerimiento energético para mantener el confort térmico y para calentar agua sanitaria en un hogar habitado por cuatro personas. Finalmente, se cuantificó el desembolso mensual y anual asociado al uso de los energéticos relacionados a la conservación del confort térmico en la vivienda y a la satisfacción de la necesidad de aseo con agua caliente.

3.1. Temperaturas en el interior de la vivienda

En la Figura 3 se muestran las temperaturas promedio horarias que se alcanzan en el interior de las viviendas. Estas temperaturas son las resultantes debidas a la interacción de la envolvente térmica de la vivienda con el clima existente en cada una de las ciudades estudiadas. Se considera que en los momentos en los que las temperaturas interiores no entren en el rango de las temperaturas de confort se deberá utilizar algún equipo de enfriamiento o calentamiento para mantener el confort térmico en el interior de la vivienda.

En la Figura 3 también se incorporó la temperatura exterior o ambiental (línea punteada) y se muestran los límites de confort máximo en amarillo (T_{c-max}) y mínimo en azul (T_{c-min}), los cuales varían de acuerdo a las condiciones climáticas prevalentes en cada localidad. Estas temperaturas fueron calculadas con las ecuaciones (1), (2) y (3) y se muestra el detalle para cada ciudad en la Tabla 2. En la ciudad de clima tropical (Cancún), se tuvo una temperatura interior máxima ($T_{int-max}$) de 32.4 °C y una temperatura interior mínima ($T_{int-min}$) de 21.6 °C. En la ciudad de clima árido cálido (Hermosillo), se observaron temperaturas interiores $T_{int-max}$ de 33.5 °C y $T_{int-min}$ de 11.6 °C, mientras que en la ciudad con clima semiárido frío (Durango) fueron $T_{int-max}$ de

31.0 °C y hasta de $T_{\text{int-min}}$ de 13.0 °C. Finalmente, en la ciudad de clima templado

(Puebla), se alcanzó una $T_{\text{int-max}}$ de 27.5 °C y una $T_{\text{int-min}}$ de 17.0 °C.

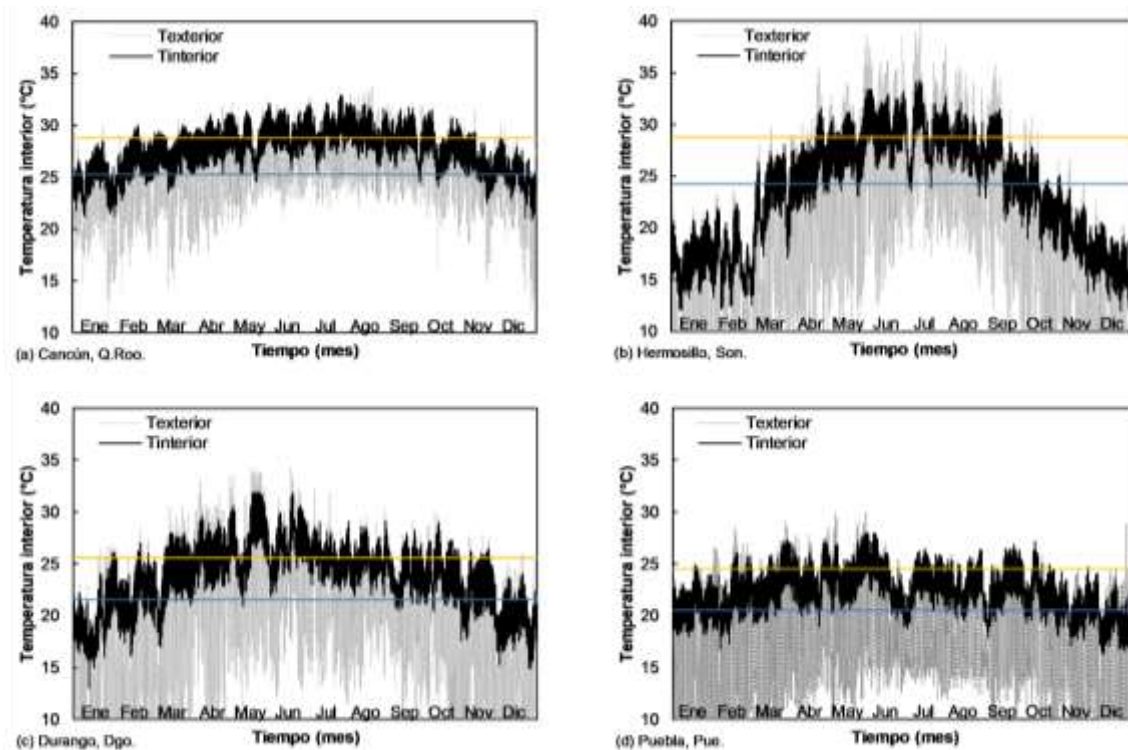


Figura 3. Temperatura ambiental de la ciudad y temperatura interior de la vivienda sin utilización de sistemas de climatización - escenario 1.

3.2. Energía

En la Figura 4, se muestra el requerimiento anual de energía para mantener el confort térmico (enfriar y calentar la vivienda), y para proporcionar agua caliente en una vivienda habitada por cuatro personas. Se presentan los resultados para los escenarios de ocupación utilizando sistemas de climatización (escenarios 2, 3 y 4) para cada localidad estudiada.

En la Figura 4, se destaca el alto uso de energía en el escenario (2), ya que es el caso cuando se climatiza la vivienda durante 24 horas, lo cual no es el patrón de uso más frecuente; sin embargo, se calculó por ser una situación acontecida durante el confinamiento inicial por la COVID-19. En los resultados también se puede observar que

sobresale el uso predominante de sistemas de enfriamiento para el clima tropical (Cancún), donde el 90% del requerimiento energético anual es para confort térmico (enfriamiento + calefacción). También se distingue el requerimiento energético para confort térmico en la ciudad con clima árido cálido (Hermosillo), el cual puede alcanzar los 6,984 kWh al año (147 kWh/m²). Mientras que en Durango y Puebla se observa una proporción similar en el requerimiento de energía para confort térmico, donde tienen un promedio de uso anual de los sistemas de calefacción del 27% y 32%, respectivamente. Sin embargo, hay diferencia en los requerimientos máximos anuales para confort térmico, ya que para Durango alcanza los 126 kWh/m² y para Puebla es solo de 85 kWh/m². Sin embargo, adicionando los requerimientos para el calentamiento de agua,

el consumo energético total anual sube hasta 114 kWh/m² para Cancún, 160 kWh/m² en Puebla, 204 kWh/m² en Durango y 204 kWh/m² en Hermosillo.

Con respecto al requerimiento energético total anual (calentamiento de agua + confort térmico), se tuvieron requerimientos de 97 kWh/m² y 95 kWh/m² en Cancún, 133 kWh/m² y 121 kWh/m² en Puebla, 163 kWh/m² y 145 kWh/m² en Durango, y 163 kWh/m² y 135 kWh/m² en Hermosillo, para los escenarios 3 y 4, respectivamente. Mientras que, los requerimientos anuales para satisfacer el confort térmico en la vivienda cuando ésta es climatizada solo durante su ocupación, se tuvieron requerimientos de 46 kWh/m² y 44 kWh/m² en Cancún, 58 kWh/m² y 46 kWh/m² en Puebla, 84 kWh/m² y 67 kWh/m² en Durango, y 106 kWh/m² y 76 kWh/m² en Hermosillo, para los escenarios 3 y 4, respectivamente,

siendo el escenario 4 donde se hace un uso moderado o ahorrador de energía.

Es importante mencionar que los requerimientos energéticos de confort térmico calculados están ligados a las temperaturas de confort (T_c) que se establecieron para cada clima. Esto explica, por ejemplo, el alto uso de energía para calefacción en el clima árido cálido (Hermosillo), lo que no está asociado a la incidencia de temperaturas extremadamente bajas sino con la prevalencia de temperaturas por debajo de los 24.32 °C (T_{c-min}), temperatura a la cual se enciende el sistema de calefacción. Mientras que, para Durango y Puebla, ciudades de clima frío y templado, se tiene un requerimiento relativamente alto de energía para enfriar los hogares, debido a que los sistemas de aire acondicionado se encienden a partir de los 25.6 °C y 24.52 °C, respectivamente (T_{c-max}).

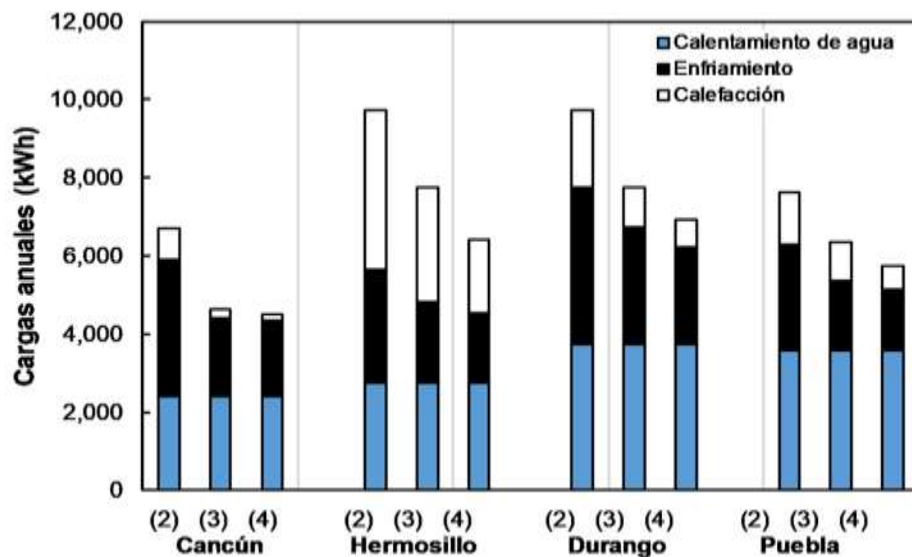


Figura 4. Requerimiento anual de energía para climatización y calentamiento de agua.

Con respecto al calentamiento de agua, se observa que en Puebla y Durango se requeriría la mayor cantidad de energía para satisfacer la necesidad de bañarse con agua caliente. Esto es consistente con el hecho de que en ambas localidades se tienen las

menores temperaturas del agua de la red local y se requiere usar el calentador prácticamente todo el año para tener una temperatura adecuada del agua de regadera. Por otro lado, la ciudad que requiere menos energía de forma anual es Cancún, ya que tiene una

temperatura consistentemente alta del agua de la red local durante todo el año.

3.3. Costos asociados a la energía.

En las Figuras 5 y 6 se muestran los desembolsos mensual y anual que tendría cada hogar para el escenario 4. Este escenario sucede cuando los sistemas de climatización se usan durante la ocupación de la vivienda, pero son apagados durante la noche; el cual se considera como un escenario de uso *moderado o ahorrador* de los sistemas de climatización. Las facturas se separaron en dos rubros, el primero es para el pago de gas que se utiliza para el sistema de calefacción y el calentamiento del agua sanitaria; mientras que el otro gasto es para el pago de electricidad para el sistema de enfriamiento y el consumo base por electrodomésticos.

En la Figura 5 se pueden observar las facturas de energía que tendrían que ser cubiertas por las familias de manera mensual. De manera general, se visualiza claramente el impacto

estacional en las facturas mensuales de gas L.P., el cual es más marcado para los climas secos (Hermosillo y Durango). También se puede observar el desembolso asociado al pago de gas L.P. en todas las ciudades de estudio, incluso para el clima tropical (Cancún), donde se utiliza predominantemente para calentar el agua. Con respecto a las facturas de electricidad, se observa que estas son mayores para las ciudades de climas templados (Durango y Puebla), lo cual está asociado al precio de la energía en la tarifa 1 de electricidad. Por último, se observa un incremento de las facturas de electricidad en Hermosillo, ciudad que cuenta con el clima con prevalencia de temperaturas muy altas durante la temporada de verano. En Cancún se observan facturas sostenidamente altas durante la mayor parte del año, pero son especialmente altas durante los meses frescos; situación que está asociada a la tarifa de electricidad de la localidad, la cual es más alta durante los meses que se encuentran fuera de verano.

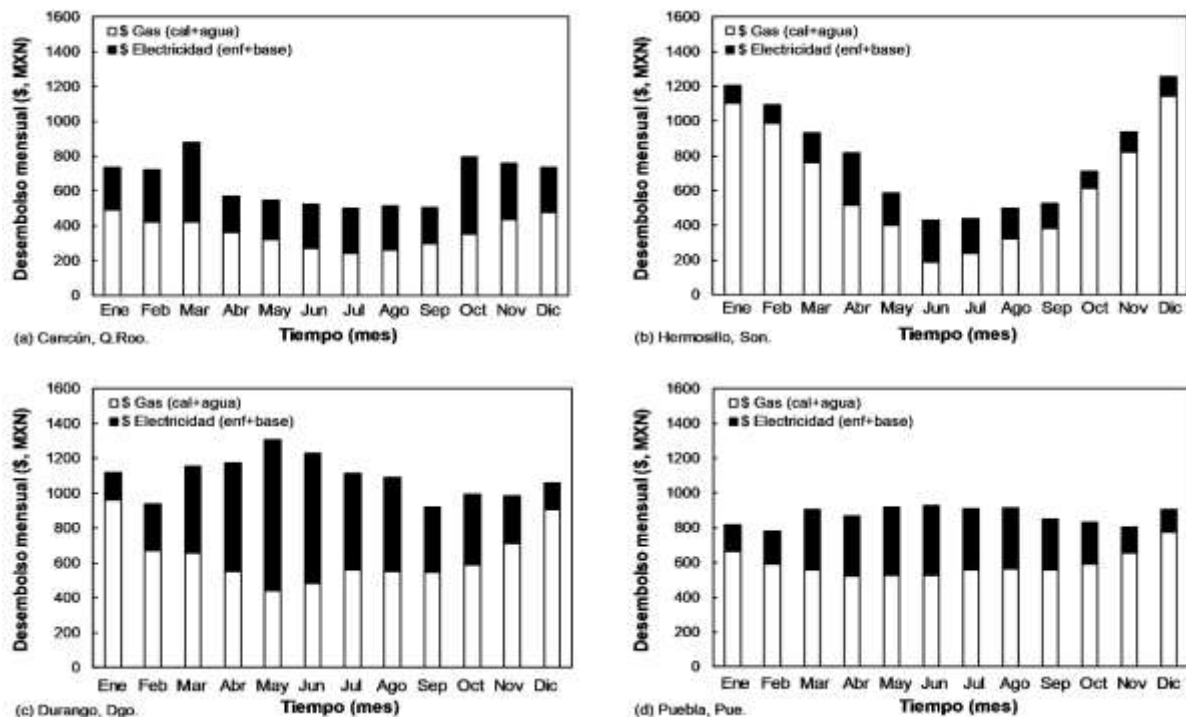


Figura 5. Desembolso mensual por climatización y uso de gas L.P. para calentamiento de agua - escenario 4.

En la Figura 6 se muestran los desembolsos anuales de energía para los escenarios (2), (3) y (4). En la Figura 6a se visualiza el desembolso que se hace para calentar el agua y para el confort térmico (calefacción y enfriamiento); mientras que en la Figura 6b se desglosó en forma de facturas anuales de energía por gas L.P. y electricidad. En la Figura 6a, para el escenario (4) se observa que, si se separa el desembolso realizado por las familias para pagar el agua caliente, en Cancún esto representa un 55% del total (calentamiento de agua + confort térmico), en

Hermosillo 60%, en Durango 57% y en Puebla 65%. Otra forma de visualizar esta información es separando el desembolso realizado por las familias para pagar por la electricidad (enfriamiento) contra el gasto por gas L.P. (agua y calefacción), con lo cual en Cancún representaría el 43% del presupuesto anual, en Hermosillo representa el 21%, en Durango 38% y en Puebla el 30%. Siendo todos los porcentajes presentados, resultados correspondientes al escenario (4), donde se modeló un uso *moderado o ahorrador* de los sistemas de climatización.

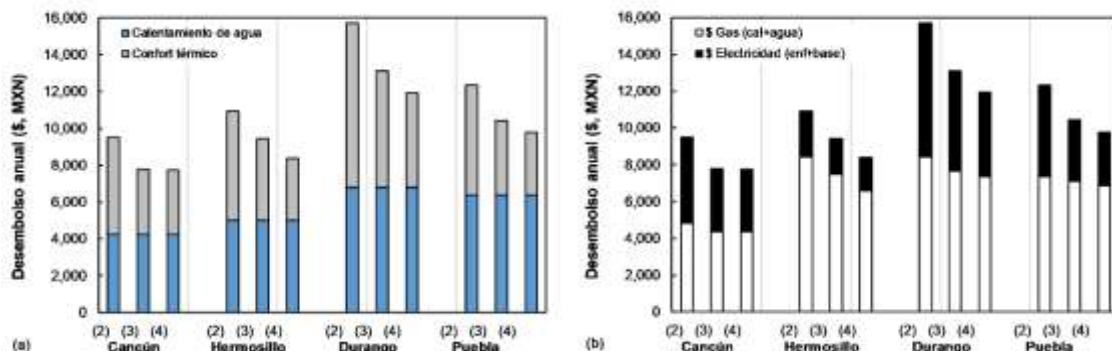


Figura 6. Desembolso anual por energía. (a) Gas y electricidad, (b) Calentamiento de agua y confort térmico.

4. Discusión

En los resultados se observaron temperaturas máximas en el interior de las viviendas superiores a los 30 °C en todas las ciudades excepto en la ciudad con clima templado subhúmedo (Puebla). El conocimiento de las temperaturas interiores máximas alcanzadas es relevante ya que estas permiten alertar sobre potenciales riesgos a la salud de los ocupantes de la vivienda. En un estudio realizado en una ciudad con clima templado húmedo (Cfb, oceánico), se encontró que, con el aumento de cada 1°C en la temperatura ambiente interior, después de los 29 °C, se podría duplicar el riesgo de muerte de sectores vulnerables como los adultos mayores de 65 años y los infantes pequeños (Buchin, Hoelscher, Meier, Nehls, & Ziegler, 2016). Sin embargo, la Organización

Mundial de la Salud recomienda observar con cautela estas cifras, ya que las personas que viven en regiones con climas templados pudieran ser más propensas a verse afectadas por las altas temperaturas y, en contraste, las personas que viven en ciudades con climas cálidos pueden tener una adaptación fisiológica debida a la exposición excesiva al calor (World Health Organization, 2018).

Por otro lado, con respecto a las temperaturas mínimas, en todas las ciudades, con excepción de la que tiene clima tropical (Cancún), se tuvieron temperaturas interiores por debajo de 18 °C, lo cual representa el límite inferior de posibles riesgos a la salud, dado que para personas de la tercera edad e infantes se deberían mantener temperaturas

entre 2 °C y 3 °C por arriba de este límite (Collins, 1986).

Con respecto a la climatización (enfriamiento y calefacción), la ciudad con mayor requerimiento energético anual es Hermosillo con 146 kWh/m², la cual tiene un clima árido cálido y presenta extremos de consumo tanto para enfriamiento como para calefacción. Cancún, con un clima tropical, necesitaría 90 kWh/m² anuales, de los cuales alrededor del 90% son dedicados al enfriamiento de los espacios interiores. Finalmente, en las ciudades con climas templados (Durango y Puebla) se requerirían 126 kWh/m² y 85 kWh/m² anuales, respectivamente. Estas tendencias se repiten para todos los escenarios estudiados.

Es importante mencionar que se observó un requerimiento energético anual sobresaliente para la ciudad de Hermosillo, lo cual está relacionado con el tipo de clima que se tiene en esta ciudad, con prevalencia de temperaturas extremas. De manera esperada, se obtuvo un requerimiento energético alto para enfriar la vivienda; sin embargo, también el requerimiento energético para calentar la vivienda fue elevado. Cabe señalar que, con la intención de considerar de mejor manera las sensaciones de las personas de acuerdo al clima que habitan, se aplicó un modelo de confort térmico adaptativo. Para ello, se tomaron en cuenta las temperaturas ambientales mensuales promedio y la amplitud de la oscilación promedio de la temperatura del aire, con el fin de identificar la amplitud de la zona de confort (ΔT_c). Esto trajo como resultado una ΔT_c de 4.0 °C para las ciudades templadas (Durango y Puebla) y de 4.5 °C para las cálidas (Hermosillo y Cancún). Estos parámetros permiten representar de mejor manera las sensaciones de confort térmico de los usuarios que habitan en distintas regiones climáticas. De esta manera, Hermosillo, al

tener un clima extremoso y una T_{c-min} alta (24.32 °C), reportó un requerimiento energético global que pudiera considerarse elevado. Sin embargo, este requerimiento elevado está asociado a la necesidad de calentar los espacios de la vivienda que se encuentren por debajo de esta temperatura.

En cuanto al requerimiento energético anual para el calentamiento de agua sanitaria, con el fin de cubrir las necesidades de una familia con cuatro integrantes, este varía desde 2,417 kWh en Cancún, hasta 3,734 kWh en Durango. Es de resaltar que en todas las localidades analizadas se necesita calentamiento de agua durante todo el año, contrario a lo que sucede con la necesidad de usar equipamiento para mantener el confort térmico, donde su uso es estacional.

Se observó que en el escenario de uso *moderado o ahorrador* se tendría un gasto mensual promedio por energéticos (electricidad y gas) de \$640 en Cancún (\$1,920 trimestral), en Hermosillo de \$652 (\$1,956 trimestral), en Durango \$978 (\$2,934 trimestral) y en Puebla de \$800 (\$2,400 trimestral). Según la ENIGH, el gasto corriente promedio mensual para el rubro de electricidad y combustibles en los hogares es de \$500 (\$1,501 trimestral) (INEGI-Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2021). Los valores obtenidos en este estudio son superiores a lo estimado por la ENIGH, recordando que existe una variación considerable en el gasto dedicado a energéticos de acuerdo al decil al que pertenezca el hogar y al clima en el cual se habite. Así, una familia en el decil I ubicada en Cancún debería desembolsar el 17% de sus ingresos para cubrir los gastos por los energéticos incluidos en este estudio, mientras que, si se ubica en Durango, la proporción aumenta al 26%.

Dados los desembolsos por electricidad y gas realizados por las familias, es de esperar que

en estos hogares se tomen medidas de privación energética para poder dar prioridad a otros gastos como la alimentación y el transporte. Es importante señalar que el porcentaje de aumento anual de energéticos como el gas L.P. y la electricidad en los últimos cinco años (2017-2022) han sido en promedio de 11.8% y 2.8%, respectivamente; en tanto que estas variaciones durante el último año (2021-2022) alcanzaron un 22% para el gas L.P. y 5% para la electricidad (Banxico, 2022). Y aunque a nivel nacional se reporta un índice de pobreza energética en el hogar de 36.7% (33% para confort térmico y 8.7% en calentamiento de agua), de manera desagregada, Puebla tiene un índice estatal de pobreza energética del 51%, Quintana Roo del 40.2%, Durango del 35% y Sonora del 26.7% (García-Ochoa & Graizbord, 2016a). Este índice está ligado al nivel de rezago social de las entidades, pero también a la imposibilidad de pagar por los energéticos requeridos para satisfacer necesidades energéticas como el confort térmico, calentamiento de agua, tener refrigerador eficiente e iluminación, por mencionar algunas. Asimismo, en un estudio realizado en Argentina se encontró que el equipo de enfriamiento se tiende a subutilizar debido a factores económicos (Flores-Larsen, Silvana, Filippín, 2021). Por otro lado, es fundamental tener en consideración que en México la electricidad en el sector doméstico se encuentra subsidiada; y, que estos índices también pueden reflejar que el acceso a algunos servicios energéticos es limitado (Santillán, Cedano, & Martínez, 2020).

5. Conclusiones

Se realizó una investigación para identificar el requerimiento energético de viviendas localizadas en diversos climas en México con la finalidad de cuantificar el gasto en el hogar por el pago de energía eléctrica y gas L.P. asociado a la conservación del confort

térmico y para el calentamiento de agua sanitaria.

De manera general, los resultados indican que en las cuatro ciudades estudiadas se tiene un gasto importante por concepto del uso de gas L.P., llegando a destinarse entre el 55% y el 66% del desembolso total de energía para el calentamiento de agua. Por otro lado, el gasto en electricidad destinada al uso de los sistemas de aire acondicionado para enfriamiento representa entre el 23% y el 44% del total erogado por concepto del mantenimiento del confort térmico y para el calentamiento de agua sanitaria.

Adicionalmente, al considerar las facturas de energía a pagar por las familias fue posible observar el impacto estacional en los pagos mensuales de gas L.P. Esta estacionalidad es más pronunciada en las ciudades con climas secos (Hermosillo y Durango), mientras que para las ciudades ubicadas en climas húmedos (Cancún y Puebla) la estacionalidad es más suavizada. Al analizar los desembolsos mensuales por concepto de electricidad se encontró que las ciudades en climas templados (Durango y Puebla) tienen facturas de electricidad más grandes que las de las ciudades con climas cálidos, lo cual está asociado a dos factores: (1) al precio alto de la energía en la tarifa de electricidad que les corresponde pagar, y (2) al elevado requerimiento energético asociado a las temperaturas bajas a las cuales se enciende el sistema de aire acondicionado.

Las limitaciones de este estudio indican que, aunque de manera cualitativa es posible identificar tendencias en los costos asociados al uso de energía para el confort y calentamiento de agua sanitaria en la vivienda construida en distintos climas, los resultados de esta investigación pudieran ser aplicables de forma cuantitativa únicamente en las ciudades que fueron objeto de este estudio. Esto está principalmente asociado a las

particularidades meteorológicas, como el comportamiento de las temperaturas promedio, mínimas y máximas, la humedad relativa, la precipitación y la radiación solar específicas de cada localidad. También se debe tomar en cuenta que en este estudio se fijaron ciertos parámetros para establecer las temperaturas de confort térmico, temperatura del agua caliente y periodos de aseo de los integrantes de las familias. Por lo que es importante tener en cuenta que existe una variabilidad significativa de los hábitos familiares y preferencias personales en cuanto a las temperaturas establecidas en los termostatos de los sistemas de enfriamiento, calefacción y para el calentamiento del agua sanitaria. Asimismo, además de las particularidades asociadas a los hábitos de cada persona, los modelos de confort térmico también están asociados a condiciones demográficas (p.ej. género, peso, edad), y a otros factores como el estado de salud y la vestimenta (Jiang, Wang, Lin, & Mumovic, 2020), lo que impacta en los resultados cuantitativos de la investigación.

No obstante, a través de esta investigación se aporta información para apoyar y clarificar la necesidad de mejorar el diseño de la envolvente de las viviendas y para reforzar la implementación de programas de energías renovables, como los enfocados en la instalación de calentadores solares; ya que del desembolso total que realizan las familias, el gasto para calentar el agua va desde el 55% en la ciudad de Cancún (clima tropical) hasta un 66% en Puebla (clima templado húmedo). Esto asumiendo que las familias cuentan con el equipamiento que les permita satisfacer todas sus necesidades energéticas.

Es importante la mejora continua en el diseño y construcción de la vivienda mexicana, la actualización de la normativa de eficiencia energética existente, así como el promover una mayor disponibilidad de equipamiento económico y eficiente para lograr satisfacer

las necesidades energéticas de las familias. Por último, a través de esta investigación se desea poner énfasis en el riesgo actual por la alta dependencia de energéticos como el gas para mantener el confort térmico en las ciudades de clima templado, igual que para el calentamiento de agua sanitaria en todas las ciudades estudiadas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Instituto Municipal de Vivienda de Durango (INMUVI-Durango) por la información proporcionada.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés alguno en la realización de la presente investigación.

6. Referencias

1. Global Alliance for Buildings and Construction GABC. (2020). 2020 Global status report for buildings and construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR_ES.pdf
2. International Energy Agency IEA. (2021). Tracking Buildings 2021. <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2021>
3. SENER. (2021). Balance Nacional de Energía 2020. Ciudad de México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf
4. SENER - CONUEE. (2018). Cuadernos de la Conuee. Número 1. Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2017 e impactos de ahorro de

- energía por políticas públicas. Ciudad de México.
<https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuadernoNo.1revision.pdf>
5. Morales-Ramírez, Dionicio, Alvarado-Lagunas, Elías, González Del Ángel, L. J. (2021). Disposición al ahorro de energía eléctrica en los hogares de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 36(2), 533–561.
<https://doi.org/https://doi.org/10.24201/edu.v36i2.2002>
 6. SEDATU - CONAVI. (2017). Código de Edificación de Vivienda. Ciudad de México.
<https://www.gob.mx/conavi/documentos/codigo-de-edificacion-de-vivienda-3ra-edicion-2017>
 7. Registro Único de Vivienda (RUV). (2022). Informe estratégico RUV. Ciudad de México.
<http://portal.ruv.org.mx/wp-content/uploads/2022/03/InformeEstrategicoRuvMar2022.pdf>
 8. ONU-Hábitat. (2019). Elementos de una vivienda adecuada.
<https://www.onuhabitat.org.mx/index.php/elementos-de-una-vivienda-adecuada>
 9. Berkowitz, Bill, Brownlee, T. (2022). Sección 2. Mejorar la calidad de la vivienda. Caja de Herramientas Comunitarias (Web, pp. 1–19). Kansas: Universidad de Kansas.
<https://ctb.ku.edu/es/tabla-de-contenidos/implementar/fisico-social-y-medio-ambiente/mejorar-la-calidad-de-la-vivienda/principal>
 10. INEGI -Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2021). ENIGH E 1-2020 Encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares estacional. Ciudad de México.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/est/2020/doc/enigh2020_est_presentacion_resultados.pdf
 11. Daniel Howdle - Cable.co.uk. (2022). The price of electricity per kWh in 230 countries.
<https://www.cable.co.uk/energy/worldwide-pricing/>
 12. Beltrán Nishizaki, E. (2020). Hacia una justicia energética en México. Un análisis del régimen tarifario del sector eléctrico colombiano y su posible implementación en la República Mexicana. *enerLAC Volumen IV. Número 2*. ISSN: 2602-8042. *Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 146–159. Quito, Ecuador. Retrieved from <http://enerlac.olade.org>
 13. Gopal, A. R., Leventis, G., Phadke, A., & de la Rue du Can, S. (2014). Self-financed efficiency incentives: case study of Mexico. *Energy Efficiency*, 7(5), 865–877.
<https://doi.org/10.1007/s12053-014-9263-9>
 14. García Ochoa, R., Avila-Ortega, D. I., & Cravioto, J. (2022). Energy services' access deprivation in Mexico: A geographic, climatic and social perspective. *Energy Policy*, 164(January).
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112822>
 15. Rosas-Flores, J. A., & Gálvez, D. M. (2010). What goes up: Recent trends in Mexican residential energy use. *Energy*, 35(6), 2596–2602.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.015>

16. Hancevic, P. I., & Lopez-Aguilar, J. A. (2019). Energy efficiency programs in the context of increasing block tariffs: The case of residential electricity in Mexico. *Energy Policy*, 131(January), 320–331.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.015>
17. Rosas-Flores, J. A., & Rosas-Flores, D. (2020). Potential energy savings and mitigation of emissions by insulation for residential buildings in Mexico. *Energy and Buildings*, 209.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109698>
18. Oropeza-Pérez, I. (2016). Comparative economic assessment of the energy performance of air-conditioning within the Mexican residential sector. *Energy Reports*, 2, 147–154.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.06.002>
19. Santillán, O. S., Cedano, K. G., & Martínez, M. (2020). Analysis of energy poverty in 7 Latin American countries using multidimensional energy poverty index. *Energies*, 13(7).
<https://doi.org/10.3390/en13071608>
20. García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016a). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía Sociedad y Territorio*, 289.
<https://doi.org/10.22136/est002016465>
21. Rosas, J., Sheinbaum, C., & Morillón, D. (2010). The structure of household energy consumption and related CO2 emissions by income group in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 127–133.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.04.002>
22. García Ochoa, R., & Graizbord B. (2016b). Privation of energy services in Mexican households: An alternative measure of energy poverty. *Energy Research and Social Science*, 18, 36–49.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.04.014>
23. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares ENCEVI: Presentación de Resultados. Ciudad de México.
<https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
24. Collins, K. J. (1986). Low indoor temperatures and morbidity in the elderly. *Age and Ageing*, 15(4), 212–220.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1093/ageing/15.4.212>
25. Banxico. (2022). Índices de Precios de Energéticos Seleccionados.
<https://www.banxico.org.mx/TablasWeb/informes-trimestrales/octubre-diciembre-2021/96ACC9C5-5A33-4DB2-9288-09069198B565.html>
26. Flores-Larsen, Silvana, Filippín, C. (2021). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231(January 2021), 110576.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110576>
27. Reyes, A. (2021). Revealing the contribution of informal settlements to climate change mitigation in latin america: A case study of Isidro Fabela, Mexico City. *Sustainability*, 13(21).
<https://doi.org/10.3390/su132112108>

28. U.S. Department of Energy's (DOE) y National Renewable Energy Laboratory (NREL). EnergyPlus. Retrieved May 10, 2023, from <https://energyplus.net/>
29. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Promedio de ocupantes en viviendas particulares habitadas. Ciudad de México. <https://www.inegi.org.mx/temas/vivienda/>
30. Urban, B., & Gomez, C. (2013). A case for thermostat user models. In BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association (pp. 1483–1490). Chambéry, France. https://www.aivc.org/sites/default/files/p_2337.pdf
31. Lucero-Álvarez, J., Rodríguez-Muñoz, N., & Martín-Domínguez, I. (2016). The Effects of Roof and Wall Insulation on the Energy Costs of Low Income Housing in Mexico. *Sustainability*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/su8070590>
32. Climate-Data.org. (2022). Climate data for cities worldwide. from <https://en.climate-data.org/>
33. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). Climatología. Geografía y Medio Ambiente. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
34. ANSI/ASHRAE Standard 55–2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2013.
35. Alliance for an Energy Efficient Economy AEEE. (2020). Adaptive Thermal Comfort in Sustainable Cooling Solutions. Retrieved May 15, 2023, from <https://aeee.in/sharing-posts/adaptive-thermal-comfort-in-sustainable-cooling-solutions/>
36. Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
37. Barrios, Guillermo, Elías, Pablo, Huelsz, Guadalupe, Rojas, J. (2010). Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. I. Marincic Lovriha (Ed.), *Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto* (Vol. III, p. 104). Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.
38. Diario Oficial de la Federación. NOM-003-ENER-2021, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial. Límites, métodos de prueba y etiquetado. (2021). México. https://dof.gob.mx/2021/SENER/SENER_150921.pdf
39. Diario Oficial de la Federación. NOM-008-CNA-1998, Regaderas Empleadas en el Aseo Corporal - Especificaciones y Métodos de Prueba. (1998). México. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/n8.pdf>
40. SMN - CONAGUA. (2022). Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

41. Morales, L. (2022). Tarifas domésticas CFE 2022: ¿Cómo saber en cuál estoy? <https://tarifasdeluz.mx/cfe-tarifas>
42. Comisión Federal de Electricidad. (2022). Esquema tarifario vigente. Hogar. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>
43. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE. (2017). Costos y beneficios de la norma oficial mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020-ENER). Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/234755/Impacto_NOM-020-junio-2017-FINAL.pdf
44. CRE Comisión Reguladora de Energía. (2022). Precios al público del gas LP reportados por los distribuidores. <https://www.gob.mx/cre/documentos/precios-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores>
45. World Health Organization. (2018). Chapter 5. High indoor temperatures. WHO Housing and Health Guidelines. Geneva, Switzerland. Retrieved May 10, 2023, from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK535285/>
46. Jiang, Y., Wang, Z., Lin, B., & Mumovic, D. (2020). Development of a health data-driven model for a thermal comfort study. Building and Environment, 177(December 2019).